

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовому и дипломному проектированию

«РАСЧЕТ ЭЖЕКТОРА»

для специальностей 7.090500 «Теплоэнергетика»
и 7.000008 «Энергетический менеджмент»

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета
Протокол № 3 от 21.12.07

Харьков НТУ «ХПИ» 2007

Методические указания к курсовому и дипломному проектированию «Расчет эжектора» для студентов специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент» / Сост. Р.Г. Акмен, А.П. Желтоноженко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 20 с. Рус. яз.

Составители: Р.Г. Акмен
А.П. Желтоноженко

Рецензент Е. Н. Бесчаров, проф. кафедры теплотехники
НТУ «ХПИ»

Кафедра теплотехники

ВВЕДЕНИЕ. ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Струйные аппараты (эжекторы, компрессоры) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. В частности, они используются в конденсационных устройствах паротурбинных установок, в некоторых типах выпарных установок. Для инженера теплоэнергетика подобные установки рассматриваются как в курсовом, так и в дипломном проектировании. Подробная методика расчета таких аппаратов изложена в [1,2], однако, дефицит этой литературы и потребности проектантов приводят к необходимости более краткого изложения основ расчета и конструирования подобных аппаратов. Настоящие методические указания содержат основы и пример расчета эжектора, как наиболее широко применяемого струйного аппарата.

В дальнейшем приняты следующие основные обозначения.

G – массовый расход;

K – коэффициент скорости;

P – давление;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

a – местная скорость звука;

i – энтальпия;

f – площадь поперечного сечения;

k – показатель адиабаты;

q – приведенная массовая скорость;

u – коэффициент инжекции;

v – удельный объем;

Π – относительное давление;

β – относительный удельный объем или отношение площадей в конической камере смешения;

ε – относительная плотность;

φ – коэффициент скорости;

λ – приведенная адиабатная скорость;

ρ – плотность;

τ – относительная температура;

ω – скорость.

Простой нижний индекс

Сечения аппарата:

* – критическое сечение рабочего сопла;

1 – выходное сечение рабочего сопла;

2 – входное сечение камеры смешения;

3 – выходное сечение камеры смешения.

Потоки:

p – рабочий поток перед соплом струйного аппарата;

$и$ – инжектируемый поток перед приемной камерой струйного аппарата;

c – сжатый поток после диффузора струйного аппарата;

0 – адиабатически заторможенный поток.

Сложный нижний индекс

p^* – рабочий поток в критическом сечении сопла;

p_1 – рабочий поток в выходном сечении сопла;

p_2 – рабочий поток во входном сечении камеры смешения;

p_3 – инжектируемый поток во входном сечении камеры смешения.

p_4 – смешанный поток в выходном сечении камеры смешения.

1. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

При расчете струйных аппаратов используются газодинамические функции, связывающие приведенную адиабатную скорость потока газа или пара с его термодинамическими параметрами [1].

Под приведенной адиабатной скоростью понимается отношение скорости газа при его адиабатном течении к критической скорости:

$$\lambda = \frac{w_a}{a_*}. \quad (1.1)$$

Критическая скорость газа, представляющая собой скорость потока, равную местной скорости звука, определяется как

$$a_* = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_0} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_0 v_0}, \quad (1.2)$$

Показатель адиабаты для идеального газа

$$k = \frac{c_p}{c_v}.$$

Параметр λ может изменяться в пределах от $\lambda=0$, что соответствует неподвижной среде, до $\lambda_{\max} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}}$, что соответствует истечению потока в абсолютный вакуум.

Для двухатомных газов

$$k = 1,4, \quad \sqrt{\frac{2k}{k+1}} = 1,08, \quad \lambda_{\max} = 2,45,$$

для перегретого водяного пара

$$k = 1,3, \quad \sqrt{\frac{2k}{k+1}} = 1,06, \quad \lambda_{\max} = 2,77,$$

для сухого насыщенного водяного пара

$$k = 1,13, \quad \sqrt{\frac{2k}{k+1}} = 1,03, \quad \lambda_{\max} = 4,05.$$

Наиболее часто используются следующие газодинамические функции.

Функция $\tau(\lambda)$ – относительная температура, т.е. отношение абсолютной температуры T адиабатно движущегося газа в данном сечении к абсолютной температуре адиабатного торможения T_0 :

$$\tau = \frac{T}{T_0} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2. \quad (1.3)$$

Функция $\Pi(\lambda)$ – относительное давление, т.е. отношение, статического давления P адиабатно движущегося газа в данном сечении к давлению торможения P_0 :

$$\Pi = \frac{P}{P_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (1.4)$$

Функция $\varepsilon(\lambda)$ – относительная плотность, т.е. отношение плотности ρ адиабатно движущегося потока в данном сечении к плотности ρ_0 заторможенного потока:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (1.5)$$

Функция $\beta(\lambda)$ – относительный удельный объем, т. е. отношение удельного объема v изэнтропно движущегося потока в данном сечении к удельному объему v_0 заторможенного потока:

$$\beta = \frac{v}{v_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{-\frac{1}{k-1}}. \quad (1.6)$$

Под параметрами торможения T_0, P_0, ρ_0, v_0 понимаются абсолютная температура, давление, плотность и удельный объем газа при адиабатном снижении его скорости до нуля.

Из более сложных газодинамических функций при расчете струйных аппаратов весьма часто используется функция $q(\lambda)$, представляющая собой приведенную массовую скорость: отношение массовой скорости $\omega\rho$, кг/(м² с), адиабатно движущегося потока в данном сечении к массовой скорости этого потока $a_*\rho_*$, кг/(м² с), в критическом сечении:

$$q = \frac{\omega\rho}{a_*\rho_*} = \frac{\omega}{a_*} \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\rho_0}{\rho_*} = \frac{\lambda\varepsilon}{\varepsilon_*}. \quad (1.7)$$

Из условия сплошности потока следует, что функция q равна отношению площадей критического сечения потока и данного сечения:

$$q = \frac{f_*}{f}, \quad (1.8)$$

Для критического сечения $q_* = \lambda_* = 1$.

В различных модификациях функцию q можно записать так:

$$q = \frac{f_*}{f} = \frac{\lambda\varepsilon}{\varepsilon_*} = \lambda_{\max} \left(\frac{\Pi}{\Pi_*} \right)^{\frac{1}{k} \sqrt{1 - \Pi^{\frac{k-1}{k}}}} =$$

$$= \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \lambda_{\max} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_*} \sqrt{1 - k^{k-1}}. \quad (1.9)$$

В приложении приведены значения функций $\Pi(\lambda)$, $q(\lambda)$ для трех значений показателя адиабаты 1,3; 1,13; 1,4.

Как видно из уравнения (1.9), величина q обращается в нуль при $\lambda = 0$ и $\lambda = \lambda_{\max}$, достигая максимального значения $q = 1$ при $\lambda = 1$.

При истечении в абсолютный вакуум, ($\lambda = \lambda_{\max}$) приведенный массовый расход $q = 0$, поскольку относительная удельная плотность ε обращается в нуль.

Влияние показателя адиабаты на значения функции $q(\lambda)$ существенно сказывается вблизи сверхзвуковой области при $\lambda > 1$.

В некоторых расчетах, в частности при расчете характеристик струйных компрессоров и эжекторов без диффузоров, удобно использовать отношение газодинамических функций

$$\omega = \frac{q}{\Pi} = \frac{\lambda}{\varepsilon_* \Pi^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{\lambda}{\varepsilon_* \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)}. \quad (1.10)$$

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЖЕКТОРА

К газоструйным эжекторам, согласно принятой классификации [2], относятся струйные аппараты со степенью сжатия инжектируемой среды $P_c / P_{\text{и}} > 2,5$. При такой степени сжатия оптимальной является коническая форма камеры смешения.

Для увеличения предельного коэффициента инжекции и сохранения большой степени сжатия в газоструйных эжекторах камера смешения выполняется состоящей из двух частей: развитой конической сужающейся части (конфузора) и последующей цилиндрической части (горловины).

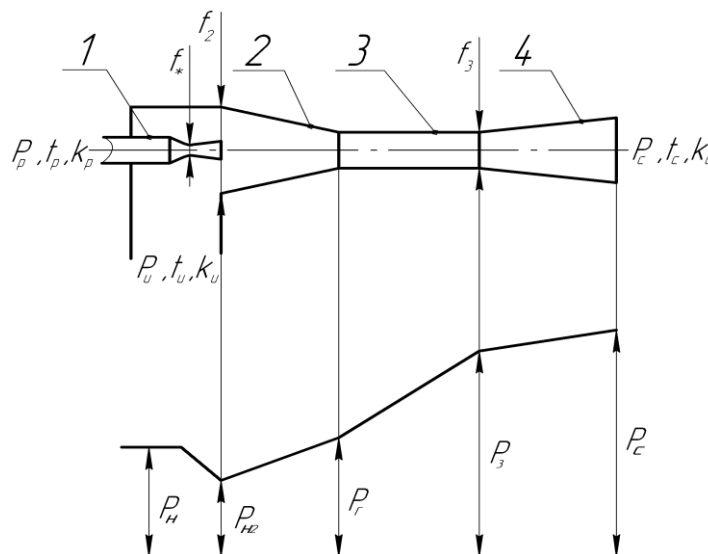


Рисунок – Схема эжектора

На рис. схематически изображен профиль проточной части эжектора и указаны основные обозначения, а так же распределение давления в проточной части аппарата.

Выходное сечение рабочего сопла условно совмещено с входным сечением камеры смешения. Считается, что на участке между плоскостью выходного сечения сопла и входным сечением конфузора рабочий и инжектируемый потоки текут изолированно и не смешиваются или что выходное сечение сопла совпадает с входным сечением конфузора.

Для камеры смешения, состоящей из конической и цилиндрической частей, уравнение сохранения импульса можно записать следующим образом

$$\varphi_2 (G_p \omega_{p2} + G_{и} \omega_{и2}) - (G_p + G_{и}) \omega_3 = P_3 f_3 + \int_{f_2}^{f_3} P df - P_{p2} f_{p2} - P_{и2} f_{и2}, \quad (2.1)$$

где $\int_{f_2}^{f_3} P df$ – интеграл импульса сил обусловленный реакцией стенок конфузора.

Введением в первый член левой части уравнения (2.1) множителя $\varphi_2 < 1$ учитывается потеря количества движения в камере смешения из-за трения. Так как считается, что выходное сечение рабочего сопла совмещено с входным сечением камеры смешения то $f_{p2} = f_{p1}$, и $\omega_{p2} = \omega_{p1}$. При расчетном режиме работы аппарата $P_{p2} = P_{p1} = P_{и}$. Пренебрегается начальными скоростями ω_p и $\omega_{и}$ рабочего и инжектируемого потоков в подводящих трубопроводах, из-за малости этих скоростей по сравнению со скоростями этих потоков в камере смешения. Вводя с помощью коэффициентов скорости поправку на неадиабатность процессов расширения и сжатия, можно выразить скорости потоков в характерных сечениях камеры смешения струйного аппарата следующими уравнениями.

Скорость рабочего потока во входном сечении камеры смешения

$$\omega_{p2} = \varphi_1 a_{p*} \lambda_{p2} = \varphi_1 a_{p*} \lambda_{pи}. \quad (2.2)$$

При $P_{p2} = P_{и}$, $\Pi_{p2} = \frac{P_{p2}}{P_p} = \frac{P_{и}}{P_p} = \Pi_{pи}$, откуда $\lambda_{p2} = \lambda_{pи}$.

Скорость инжектируемого потока во входном сечении камеры смешения

$$\omega_{и2} = \varphi_4 a_{и*} \lambda_{и2}. \quad (2.3)$$

Аналогично, пренебрегая скоростью ω_c сжатого потока на выходе из диффузора, можно написать выражение для скорости смешанного потока в выходном сечении камеры смешения:

$$\omega_3 = \frac{a_{c*}}{\varphi_3} \lambda_{c3}. \quad (2.4)$$

В уравнениях (2.2) – (2.4) φ_1 , φ_3 , φ_4 – коэффициенты скорости рабочего сопла, диффузора, входного участка камеры смешения.

Для конической камеры смешения

$$f_3 = \frac{f_2}{\beta} = \frac{f_{p2} + f_{и2}}{\beta} = \frac{f_{p1} + f_{и2}}{\beta}. \quad (2.5)$$

Критическое сечение любого потока выражается формулой

$$f_* = \frac{G a_*}{k \Pi_* P_0}. \quad (2.6)$$

Согласно уравнению (1.9) площадь любого сечения потока f может быть выражена через площадь критического сечения f_* по формуле

$$f = \frac{f_*}{q}. \quad (2.7)$$

На основе уравнений (2.6) и (2.7) площадь рабочего потока в сечении 2–2

$$f_{p2} = \frac{G_p a_{p*}}{k_p \Pi_{p*} P_p q_{p2}} = \frac{G_p a_{p*}}{k_p \Pi_{p*} P_p q_{pи}}. \quad (2.8)$$

В уравнении (2.8) принято $q_{p2} = q_{pи}$, поскольку при расчетном режиме $P_{p2} = P_{pи}$ и, следовательно, $\Pi_{p2} = \Pi_{pи}$.

Пропорциональная площадь инжектируемого потока в сечении 2–2

$$f_{и2} = \frac{G_{и} a_{и*}}{k_{и} \Pi_{и*} P_{и} q_{и2}}. \quad (2.9)$$

Пропорциональная площадь смешанного потока в сечении 3–3

$$f_3 = \frac{G_c a_{c*}}{\beta k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}}. \quad (2.10)$$

На основе уравнения (2.5) при конической камере смешения

$$f_3 = \frac{G_p a_{p*}}{\beta k_p \Pi_{p*} P_p q_{pи}} + \frac{G_{и} a_{и*}}{\beta k_{и} \Pi_{и*} P_{и} q_{и2}} = \frac{G_c a_{c*}}{\beta k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}}. \quad (2.11)$$

$\Pi_{3г} = P_{г} / P_3 > 2,5$ – отношение давлений в начале и в конце цилиндрической части камеры смешения.

Повышение давления в камере смешения выразим с помощью зависимостей:

$$\Pi_{3г} = \frac{P_{г}}{P_3} = \left(\frac{P_2}{P_3} \right)^{\alpha} = \left(\frac{P_{и}}{P_c} \right)^{\alpha} \left(\frac{\Pi_{и2}}{\Pi_{c3}} \right)^{\alpha}, \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{\lg(P_3 / P_{г})}{\lg(P_3 / P_2)} = \frac{\lg P_3 - \lg P_{г}}{\lg P_3 - \lg P_2}. \quad (2.13)$$

Принимая линейный рост давления в конфузоре (см. рис.) и имея в виду, что $f_{г} = f_3$, находим

$$\int_{f_2}^{f_3} P df = P_{и2} f_3 \Phi_1 + P_{г} f_3 \Phi_2 = P_{и2} f_3 \Phi_1 + P_3 \Pi_{3г} f_3 \Phi_2, \quad (2.14)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{1}{3}(2\beta - \sqrt{\beta} - 1); \quad \Phi_2 = \frac{1}{3}(\beta + \sqrt{\beta} - 2) \quad (2.15)$$

Среднее значение

$$\Phi_{\text{ср}} = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2} = \frac{1}{2}(\beta - 1). \quad (2.16)$$

Если вместо значений Φ_1 и Φ_2 принять их среднее значение, то относительное максимальное отклонение Φ_1 и Φ_2 от среднего значения составит:

$$\frac{\Phi_1 - \Phi_2}{2 \Phi_{\text{ср}}} = \frac{1}{3} \frac{\sqrt{\beta} - 1}{\sqrt{\beta} + 1} \quad (2.17)$$

При обычно принимаемых значениях $\beta = 2 \div 3$ относительная ошибка в

определении $\int_{f_2}^{f_3} P df$ в результате замены Φ_1 и Φ_2 их средним значением не превосходит $5 \div 8\%$, что вполне допустимо, если учитывать приближенность принятого линейного закона роста давления в конфузоре. С учетом принятых допущений

$$\int_{f_2}^{f_3} P df = \Phi_{\text{ср}} f_3 (P_{\text{и2}} + P_3 \Pi_{3\Gamma}) = 0,5 f_3 (\beta - 1) (P_{\text{и2}} + P_3 \Pi_{3\Gamma}). \quad (2.18)$$

Подставляя в уравнение (2.1) значения скоростей $\omega_{\text{р2}}; \omega_{\text{и2}}; \omega_3$ по (2.5) – (2.7); значение сечений потоков $f_{\text{р2}}; f_{\text{и2}}; f_3$ из (2.12) – (2.14); значения

статических давлений $P_{\text{и2}} = P_{\text{и}} \Pi_{\text{и2}}; P_3 = P_{\text{с}} \Pi_{\text{с3}}$ и значение $\int_{f_2}^{f_3} P df$ из (2.18),

получаем после соответствующих преобразований следующее уравнение для расчёта коэффициента инжекции газоструйного эжектора:

$$u = \frac{K_1 \frac{a_{\text{р*}}}{a_{\text{с*}}} \lambda_{\text{рн}} - K_3 \lambda_{\text{с3}}}{K_4 \lambda_{\text{с3}} - K_2 \frac{a_{\text{и*}}}{a_{\text{с*}}} \lambda_{\text{и2}}} \quad (2.19)$$

где

$$K_1 = \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \quad (2.20)$$

$$K_2 = \Phi_2 \Phi_3 \Phi_4 \quad (2.21)$$

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{p*} P_c}{a_{c*} P_p} \frac{\Pi_{c3} - \frac{P_{и}}{P_c} \left(\beta - 0,5(\beta - 1) \Pi_{и2} \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_{и}} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{\Pi_{c3}}{\Pi_{и2}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k_p \beta \Pi_{p*} q_{pи} \lambda_{c3}}, \quad (2.22)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{a_{и*} P_c}{a_{c*} P_{и}} \frac{\Pi_{c3} - \Pi_{c2} \left(\beta - 0,5(\beta - 1) \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_{и}} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{\Pi_{c3}}{\Pi_{и2}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k_{и} \beta \Pi_{и*} q_{и2} \lambda_{c3}}, \quad (2.23)$$

В частном случае при $k_p = k_{и} = k$ и $R_p = R_{и} = R$

$$u = \frac{K_1 \lambda_{pи} - K_3 \lambda_{c3}}{K_4 \lambda_{c3} - K_2 \lambda_{и2}} \frac{1}{\sqrt{\theta}}, \quad (2.24)$$

где

$$K_3 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_p} \frac{\Pi_{c3} - \frac{P_{и}}{P_c} \left(\beta - 0,5(\beta - 1) \Pi_{и2} \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_{и}} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{\Pi_{c3}}{\Pi_{и2}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k \beta \Pi_{*} q_{pи} \lambda_{c3}}, \quad (2.25)$$

$$K_4 = 1 + \varphi_3 \frac{P_c}{P_{и}} \frac{\Pi_{c3} - \Pi_{c2} \left(\beta - 0,5(\beta - 1) \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_{и}} \right)^{1-\alpha} \left(\frac{\Pi_{c3}}{\Pi_{и2}} \right)^{1-\alpha} \right) \right)}{k \beta \Pi_{*} q_{и2} \lambda_{c3}}. \quad (2.26)$$

Значения $\lambda_{и2}$ и λ_{c3} в уравнении связаны между собой геометрическими размерами газоструйного эжектора. Эта связь определяется выражением (2.5), которое с учетом того, что

$$f_3 = \frac{G_p (1 + u) a_{c*}}{k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}} \quad (2.27)$$

запишется в следующем виде

$$\frac{a_{p*}}{k_p \Pi_{p*} P_p q_{pи}} + \frac{u a_{и*}}{k_{и} \Pi_{и*} P_{и} q_{и2}} = \frac{\beta (1 + u) a_{c*}}{k_c \Pi_{c*} P_c q_{c3}}. \quad (2.28)$$

Отсюда

$$q_{и2} = \frac{u}{\beta (1 + u) \frac{a_{c*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_p} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{p*}} \frac{P_{и}}{P_p} \frac{1}{q_{c3}} - \frac{a_{p*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_p} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{p*}} \frac{P_{и}}{P_p} \frac{1}{q_{pи}}}. \quad (2.29)$$

В частном случае, когда показатели адиабаты рабочего и инжектируемого потоков одинаковы, т. е. $k_p = k_{и} = k$ и $R_p = R_{и} = R$

$$q_{и2} = \frac{u\sqrt{\theta}}{\beta(1+u\sqrt{\theta}) \frac{P_{и}}{P_c} \frac{1}{q_{с3}} - \frac{P_{и}}{P_p} \frac{1}{q_{ри}}} . \quad (2.30)$$

При расчете достижимого коэффициента инжекции газоструйного эжектора с конической камерой смешения, необходимо учесть ограничивающее условие, заключающееся в том, что в любом из промежуточных сечений конической части камеры смешения, обозначенном $s-s$ (см. рис), скорость инжектируемого потока не может превышать критическую скорость т.е. $\lambda_{и2} \leq 1$.

Коэффициент инжекции находится при предельном режиме:

$$u_{пр} = \frac{\mu \frac{a_{с*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_c} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{с*}} \frac{P_{и}}{P_c} \frac{1}{q_{с3}} - \frac{a_{р*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_p} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{р*}} \frac{P_{и}}{P_p} \frac{1}{q_{ри}}}{1 - \mu \frac{a_{с*}}{a_{и*}} \frac{k_{и}}{k_c} \frac{\Pi_{и*}}{\Pi_{с*}} \frac{P_{и}}{P_c} \frac{1}{q_{с3}}} . \quad (2.31)$$

При $k_p = k_{и} = k$ и $R_p = R_{и} = R$

$$u_{пр} = \frac{\mu \frac{P_{и}}{P_c} \frac{1}{q_{с3}} - \frac{P_{и}}{P_p} \frac{1}{q_{ри}}}{1 - \mu \frac{P_{и}}{P_c} \frac{1}{q_{с3}}} \frac{1}{\sqrt{\theta}} \quad (2.32)$$

Действительный коэффициент инжекции газоструйного эжектора u не может превышать $u_{пр}$, т.е. $u \leq u_{пр}$. Значение μ , определяющее величину $u_{пр}$, пока не может быть определено теоретически. На основании результатов испытаний газоструйных эжекторов можно принимать значение $\mu = 1,35 \div 1,5$.

Методика расчета достижимого коэффициента инжекции u по приведенным уравнениям следующая:

1. при расчёте задаются значения β и α . Значения β , принимаемые обычно на основании многочисленных испытаний, проведенных заводами, изготавливающими пароструйные эжекторы, находятся в диапазоне $2 \div 3$. Значение $\alpha \approx 0,5$, для эжектора с оптимальной формой проточной части;
2. определяются критические скорости потоков по (1.2);
3. определяют $\Pi_{ри}$ по (2.2) и находятся соответствующие значения $\lambda_{ри}$ и $q_{ри}$ по газодинамическим таблицам при известном k ;
4. задается значение $\lambda_{с3}=1$;
5. по газодинамическим таблицам при известному $\lambda_{с3}$ и k находятся соответствующие значения $q_{с3}$ и $\Pi_{с3}$;
6. определяется $u_{пр}$ по (2.31) или по (2.32);
7. определяется $q_{и2}$ по (2.29) или по (2.30) и находятся соответствующие значения $\lambda_{и2}$ и $\Pi_{и2}$ по газодинамическим таблицам при известном k ;

8. определяются коэффициенты скорости K_1, K_2, K_3, K_4 по (2.20) – (2.23) или по (2.20), (2.21), (2.25) и (2.26);

9. определяется значение u по (2.19) или по (2.24);

10. сравниваются полученные значения u и $u_{пр}$, при $u > u_{пр}$ уменьшается $\lambda_{сз}$ с шагом 0,1 и расчёт повторяется с пункта 5. до тех пор, пока выполниться неравенство $u < u_{пр}$;

11. вычисляется отличие коэффициентов δu , если оно меньше заданной степени точности расчёт считается законченный, в противном случае шаг уменьшается в 10 раз и последний интервал по $\lambda_{сз}$ рассчитывается, начиная с пункта 5.

3. ПРИМЕР РАСЧЁТА ПАРОВОГО ЭЖЕКТОРА

Исходные данные.

Насыщенный рабочий пар перед эжектором имеет давление $P_p = 6 \cdot 10^5$ Па, а инжектирует насыщенный пар – $P_{и} = 5,4 \cdot 10^3$ Па. После эжектора сжатый насыщенный пар должен иметь давление $P_c = 3,1 \cdot 10^4$ Па, расход сжатого пара $G_c = 2,3$ кг/с. Критическое отношение давлений для насыщенного пара составляет $\Pi_* = 0,579$, а показатель адиабаты – $k = 1,13$. Принять скоростные коэффициенты рабочего сопла, диффузора, входного и выходного участков камеры смешения соответственно равными $\varphi_1 = 0,95$; $\varphi_2 = 0,975$; $\varphi_3 = 0,9$; $\varphi_4 = 0,925$. Принять отношение площадей поперечных сечений начала и конца конической камеры смешения $\beta = 2$, а отношение площади поперечного сечения с критической скоростью инжектируемого потока и площади конца конической части камеры смешения $\mu = 1,5$. Температура окружающей среды $T_{о.с.} = 300$ К. Степень точности принять 0,5%.

Определить.

- достижимый коэффициент инжекции;
- размеры характерных сечений эжектора;
- коэффициент полезного действия эжектора.

Решение.

Определяем недостающие термодинамические параметры потоков. Для рабочего потока $v_p = 0,32 \text{ м}^3/\text{кг}$, $i_p = 2756 \text{ кДж/кг}$, $s_p = 6,76 \text{ кДж/(кг К)}$, для инжектируемого – $v_{и} = 26,4 \text{ м}^3/\text{кг}$, $i_{и} = 2564 \text{ кДж/кг}$, $s_{и} = 8,35 \text{ кДж/(кг К)}$, для смешанного – $v_c = 5,11 \text{ м}^3/\text{кг}$, $s_c = 7,77 \text{ кДж/(кг К)}$.

Критические скорости рабочего и инжектируемого потоков определяются по (1.2), соответственно $a_{p*} = 451 \text{ м/с}$, $a_{и*} = 389 \text{ м/с}$.

$$\text{Обозначим } \sqrt{\theta} = \frac{a_{и*}}{a_{p*}} = \frac{389}{451} = 0,862, \text{ тогда } \frac{1}{\sqrt{\theta}} = \frac{1}{0,862} = 1,16.$$

Относительное давление

$$P_{p2} = P_{p1} = \frac{P_u}{P_p} = \frac{5,4 \cdot 10^3}{6 \cdot 10^5} = 0,009$$

Согласно P_u / P_p по газодинамическим таблицам (таб. П2) определяем приведенную адиабатическую скорость $\lambda_{p1} = 2,62$ и приведенную массовую скорость $q_{p1} = 0,066$.

Расчёт ведём методом подекадных приближений.

Первоначально принимаем $\lambda_{c3} = 1$, согласно λ_{c3} по газодинамическим таблицам (таб. П2) определяем приведенную массовую скорость $q_{c3} = 1$ и относительное давление $P_{c3} = 0,5787$.

Предельный коэффициент инжекции определяется по (2.35), соответственно $u_{пр} = 0,161$.

Приведенная массовая скорость определяется по (2.30), соответственно $q_{и2} = 0,602$.

Согласно $q_{и2}$ по газодинамическим таблицам (таб. П2) определяем приведенную адиабатическую скорость $\lambda_{и2} = 0,399$ и относительное давление. $P_{и2} = 0,918$

Относительное давление

$$P_{c2} = \frac{P_u}{P_c} P_{и2} = \frac{5,4 \cdot 10^3}{3,1 \cdot 10^4} \cdot 0,911 = 0,16.$$

Коэффициенты скорости определяется по (2.20), (2.21), (2.25) и (2.26). Соответственно $K_1 = 0,834$, $K_2 = 0,812$, $K_3 = 1,275$, $K_4 = 4,055$.

Достижимый коэффициент инжекции определяется по (2.24), $u = 0,301$.

Отличие коэффициентов инжекции

$$\delta u = \frac{|u - u_{пр}|}{0,5(u + u_{пр})} \cdot 100\% = \frac{|0,161 - 0,301|}{0,5(0,161 + 0,301)} \cdot 100\% = 60,7\%.$$

Поскольку полученное отличие коэффициентов инжекции больше заданной степени точности и значение $u > u_{пр}$, что невозможно, принимаем для этих условий как расчётный коэффициент инжекции $u_{расч} = 0,196$.

Расчет повторяем по этому же алгоритму, снижая λ_{c3} с шагом 0,1 пока не выполнится неравенство $u < u_{пр}$. После чего проходим, последний интервал с шагом в десять раз меньшим, пока не добьемся заданной точности расчёта.

Данные расчёта занесены в таблицу.

Таблица – Результаты расчёта парового эжектора

$\lambda_{с3}$	$q_{с3}$	$\Pi_{с3}$	$u_{пр}$	$q_{и2}$	$\lambda_{и2}$	$\Pi_{и2}$	$\Pi_{с2}$	K_3	K_4	u	$u_{расч}$
1	1	0,578	0,161	0,602	0,399	0,918	0,160	1,275	4,055	0,301	0,161
0,9	0,989	0,644	0,166	0,605	0,402	0,917	0,160	1,354	4,881	0,290	0,166
0,8	0,956	0,707	0,182	0,616	0,411	0,914	0,159	1,451	5,840	0,285	0,182
0,7	0,899	0,768	0,212	0,632	0,424	0,909	0,158	1,572	6,970	0,286	0,212
0,6	0,821	0,825	0,266	0,653	0,441	0,902	0,157	1,728	8,354	0,292	0,266
0,5	0,721	0,875	0,361	0,676	0,460	0,893	0,156	1,938	10,16	0,303	0,361
0,59	0,811	0,830	0,273	0,655	0,443	0,901	0,157	1,746	8,512	0,293	0,273
0,58	0,803	0,835	0,281	0,657	0,444	0,900	0,157	1,765	8,674	0,294	0,281
0,57	0,793	0,840	0,289	0,659	0,446	0,899	0,157	1,784	8,841	0,295	0,289
0,56	0,783	0,845	0,297	0,662	0,448	0,893	0,157	1,804	9,012	0,296	0,297
0,569	0,785	0,844	0,290	0,660	0,447	0,899	0,157	1,786	8,857	0,295	0,290
....											
0,562	0,785	0,844	0,296	0,661	0,448	0,899	0,157	1,800	8,979	0,296	0,296

Таким образом, расчетное значение коэффициента эжекции $u_{расч} = 0,296$.

К характерным сечениям парового эжектора относится: критическое сечение рабочего сопла, входное и выходное сечение камеры смешения.

Расход рабочего пара

$$G_p = \frac{G_c}{1 + u} = \frac{2,3}{1 + 0,296} = 1,775 \text{ кг/с}.$$

Площадь критического сечения определяется по (2.6), соответственно $f_* = 2,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Диаметр критического сечения $d_* = 0,051 \text{ м}$.

Площадь, которую занимает рабочий поток во входном сечении камеры смешения, определяется по (2.8), соответственно $f_p = 0,031 \text{ м}^2$.

Площадь, которую занимает инжектируемый поток во входном сечении камеры смешения, определяется по (2.9), соответственно $f_{и} = 0,084 \text{ м}^2$.

Площадь входного сечения камеры смешения

$$f_2 = f_p + f_{и} = 0,031 + 0,084 = 0,115 \text{ м}^2.$$

Диаметр входного сечения камеры смешения $d_2 = 0,389$ м.

Площадь выходного сечения камеры смешения определяется по (2.5), соответственно $f_3 = 0,059$ м².

Диаметр выходного сечения камеры смешения $d_3 = 0,275$ м.

Определяем энтальпию сжатого потока

$$i_c = \frac{i_p + u i_n}{1 + u} = \frac{2756 + 0,282 \cdot 2564}{1 + 0,282} = 2714 \text{ кДж/кг.}$$

Определяем коэффициент полезного действия при $u = 0,296$

$$\eta = \frac{u (i_c - i_n - T_{o.c.}(s_c - s_n))}{i_p - i_c - T_{o.c.}(s_p - s_c)} = \frac{0,282(2714 - 2564 - 300(7,77 - 8,35))}{2756 - 2714 - 300(6,76 - 7,77)} = 0,265.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. – М.: Госэнергоиздат. 1961.
2. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. – М.: Энергия. 1970.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Программа расчета эжектора (язык программирования – Pascal)

```
Program ejek; {Расчёт эжектора}
uses crt;
const path : string= 'D:\НТУ ХПИ\dat\'; {Путь к файлу. Указать самостоятельно}
var
Pp,Vp,Pi,Vi,Pc,Vc,Ppk,Pik,Pck,ap,ai,ac,kp,ki,kc,Pci,Ppc : double;
Ppi,lpi,qpi,Pc3,lc3,qc3,Pi2,li2,qi2,Pps,lps,qps,Pc2      : double;
fi1,fi2,fi3,fi4,my,K1,K2,K3,K4,u,upr,du,zn1,zn2,zn3      : double;
J,a,W,b,Z,c,eps,alf,be,fkr,f2,f3,Gc,Gp,Gi,G,dkr,d2,d3,h  : double;
VG                                                         : integer;
f                                                           : text;
name                                                         : string;
Function st (x,y : double) : double;
begin
if x>0 then st:=exp(y*ln(x))
else Halt
end;
begin
clrscr;
write (' Имя файла выдачи - ');
read ( name );
name:=concat(path,name,'.dat');
writeln (' Результаты в файле - ',name);
assign (f,name);
rewrite (f);
writeln ('Исходные данные');
writeln ('Введите параметры рабочего потока');
```

```

write ('Pp [Па], Vp [м3/кг], kp, Ppk');
read (Pp,Vp,kp,Ppk);
write ('Введите параметры инжектируемого потока');
write ('Pi [Па], Vi [м3/кг], ki, Pik');
{5.4e3 26.4 1.13 0.579}
read (Pi,Vi,ki,Pik);
write ('Введите параметры сжатого потока');
write ('Pc [Па], Vc [м3/кг], kc, Pck');
{3.1e4 5.11 1.13 0.579}
read (Pc,Vc,kc,Pck);
write ('Введите скоростные коэффициенты fi1, fi2, fi3, fi4,');
{0.95 0.975 0.9 0.925}
read (fi1,fi2,fi3,fi4);
write ('Введите коэффициенты alf, be, my ');
{0.5 2 1.5}
read (alf,be,my);
writeln ('Какой расход задан');
writeln (' 1-расход рабочего пара');
writeln (' 2-расход сжатого пара');
writeln (' 3-расход инжектируемого пара');
{2}
read (VG);
write ('Расход пара [кг/с]');
{2.3}
read (G);
writeln (f,' Результаты расчёта эжектора');
writeln (f,' ');
ap:=sqrt(2*kp/(kp+1))*sqrt(Pp*Vp);
ai:=sqrt(2*ki/(ki+1))*sqrt(Pi*Vi);
ac:=sqrt(2*kc/(kc+1))*sqrt(Pc*Vc);
writeln (f,' :2,'ap',' :5,'ai',' :5,'ac');
writeln (f,ap:1:1,' :2,ai:1:1,' :2,ac:1:1);
writeln (f,' ');
Pci:=Pi/Pc;
Ppc:=Pc/Pp;
Ppi:=Pi/Pp;
lpi:=sqrt(1-st(Ppi,(kp-1)/kp))*sqrt((kp+1)/(kp-1));
qpi:=lpi*st(0.5*(kp+1),1/(kp-1))*st(1-lpi*lpi*(kp-1)/(kp+1),1/(kp-1));
writeln (f,' :2,'lpi',' :5,'Ppi',' :5,'qpi');
writeln (f,lpi:1:4,' :2,Ppi:1:4,' :2,qpi:1:4);
writeln (f,' ');
K1:=fi1*fi2*fi3;
K2:=fi2*fi3*fi4;
writeln (f,' :2,'K1',' :5,'K2');
writeln (f,K1:1:3,' :2,K2:1:3);
writeln (f,' ');
write (f,' lc3',' :5,'Pc3',' :5,'qc3',' :5,'li2',' :5,'Pi2',' :5,'qi2',' :5,'Pc2',' :5);
writeln (f,'K3',' :5,'K4',' :5,'upr',' :5,'u',' :7,'du');
lc3:=1; h:=0.1;
while h>eps do
begin
repeat
Pc3:=st(1-lc3*lc3*(kc-1)/(kc+1),kc/(kc-1));

```



```

qc3:=lc3*st(0.5*(kc+1),1/(kc-1))*st(1-lc3*lc3*(kc-1)/(kc+1),1/(kc-1));
zn1:=1-((my*ac*ki*Pik*Pi)/(ai*kc*Pck*Pc*qc3));
upr:=(((my*ac*ki*Pik*Pi)/(ai*kc*Pck*Pc*qc3))-
((ap*ki*Pik*Pi)/(ai*kp*Ppk*Pp*qp))) / zn1;
qi2:=upr/(((1+upr)*(be*ac*ki*Pik*Pi)/(ai*kc*Pck*Pc*qc3))-
((ap*ki*Pik*Pi)/(ai*kp*Ppk*Pp*qp))));
a:=0.1; b:=1; eps:=1e-5;
J:=(ki-1)/(ki+1)*st(a,ki+1)+st(a,ki-1)-2*st(qi2,ki-1)/(ki+1);
W:=(ki-1)/(ki+1)*st(b,ki+1)+st(b,ki-1)-2*st(qi2,ki-1)/(ki+1);
if J*W<0 then
begin
repeat
c:=(a*W-b*J)/(W-J);
Z:=(ki-1)/(ki+1)*st(c,ki+1)+st(c,ki-1)-2*st(qi2,ki-1)/(ki+1);
if J*Z<0 then
begin b:=c;
W:=Z;
end
else
begin
a:=c;
J:=Z;
end;
until ((abs(Z)<eps) or (abs(b-a)<eps)); end
else
writeln ('На этом отрезке нет корня');
li2:=c;
Pi2:=st(1-li2*li2*(ki-1)/(ki+1),ki/(ki-1));
Pc2:=Pci*Pi2;
zn2:=kp*Ppk*lc3*qp*be*ac;
K3:=1+fi3*Ppc*ap*(Pc3-Pci*(be-0.5*(be-1)*Pi2*(1+st(1/Pci,1-alf)*st(Pc3/Pi2,1-
alf))))/zn2;
zn3:=ac*ki*Pik*lc3*qi2*be;
K4:=1+fi3*ai*(1/Pci)*(Pc3-Pc2*(be-0.5*(be-1)*(1+st(1/Pci,1-alf)*st(Pc3/Pi2,1-
alf))))/zn3;
u:=(K1*lp*ap/ac-K3*lc3)/(K4*lc3-K2*ai*li2/ac);
du:=abs((u-upr)/((u+upr)/2));
write (f,lc3:1:4,' ':2,Pc3:1:4,' ':2,qc3:1:4,' ':2,li2:1:4,' ':2,Pi2:1:4,' ':2,qi2:1:4,' ':2,Pc2:1:4);
writeln (f,' ':2,K3:1:3,' ':2,K4:1:3,' ':2,upr:1:4,' ':2,u:1:4,' ':2,du:1:4);
if u>upr then lc3:=lc3-h;
until upr>u;
h:=h/10;
writeln (f, ' ');
end;
case VG of
1: Gp:=G;
2: Gp:=G/(u+1);
3: Gp:=G/u;
else end;
fkr:=Gp*ap/(kp*Pp*Ppk);
dkr:=sqrt(1.274*fkr);
writeln (f, ' ');
f2:=(fkr/qp)+(u*Gp*ai/(ki*Pik*Pi*qi2));

```

```

d2:=sqrt(1.274*f2);
f3:=f2/be;
d3:=sqrt(1.274*f3);
writeln (f,'   Площади характерных сечений');
writeln (f,' :2,'fkr',' :7,'f2',' :6,'f3');
writeln (f,fkr:1:6,' :2,f2:1:4,' :2,f3:1:4);
writeln (f,' ');
writeln (f,'   Диаметры характерных сечений');
writeln (f,' :2,'dkr',' :4,'d2',' :5,'d3');
writeln (f,dkr:1:3,' :2,d2:1:3,' :2,d3:1:3);
writeln(' Расчет окончен. Нажмите "Esc" ');
repeat until ReadKey = #27;
readkey;
close (f);
end.

```

Таблица П.1 – Газодинамические функции для перегретого водяного пара $k=1,3$

λ	Π	q	λ	Π	q	λ	Π	q
0,02	0,9998	0,0319	0,92	0,6023	0,9925	1,82	0,08618	0,4400
0,04	0,9991	0,0637	0,94	0,5882	0,9958	1,84	0,08007	0,4204
0,06	0,9980	0,0955	0,96	0,5740	0,9982	1,86	0,07424	0,4010
0,08	0,9964	0,1271	0,98	0,5599	0,9996	1,88	0,06870	0,3818
0,10	0,9944	0,1581	1,00	0,5457	1,0000	1,90	0,06341	0,3628
0,12	0,9919	0,1900	1,02	0,5315	0,9995	1,92	0,05840	0,3441
0,14	0,9890	0,2212	1,04	0,5174	0,9982	1,94	0,05364	0,3,257
0,16	0,9855	0,2521	1,06	0,5032	0,9960	1,96	0,04915	0,3077
0,18	0,9818	0,2828	1,08	0,4891	0,9928	1,98	0,04491	0,2900
0,20	0,9776	0,3179	1,10	0,4750	0,9887	2,00	0,04092	0,2727
0,22	0,9729	0,3432	1,12	0,4611	0,9838	2,02	0,03717	0,2595
0,24	0,9679	0,3729	1,14	0,4471	0,9780	2,04	0,03366	0,2393
0,26	0,9623	0,4022	1,16	0,4333	0,9737	2,06	0,03038	0,2233
0,28	0,9564	0,4311	1,18	0,4196	0,9640	2,08	0,02732	0,2078
0,30	0,9501	0,4596	1,20	0,4050	0,9558	2,10	0,02448	0,1928
0,32	0,9434	0,4875	1,22	0,3925	0,9467	2,12	0,02185	0,1784
0,34	0,9363	0,5150	1,24	0,3791	0,9370	2,14	0,01942	0,1644
0,36	0,9288	0,5420	1,26	0,3659	0,9264	2,16	0,01718	0,1511
0,38	0,9209	0,5683	1,28	0,3528	0,9152	2,18	0,01513	0,1382
0,40	0,9127	0,5941	1,30	0,3399	0,9032	2,20	0,01325	0,1260-
0,42	0,9040	0,6193	1,32	0,3272	0,8908	2,22	0,01155	0,1144
0,44	0,8951	0,6438	1,34	0,3147	0,8773	2,24	0,01050	0,1033
0,46	0,8851	0,6677	1,36	0,3023	0,8634	2,26	0,00861	0,0929
0,48	0,8761	0,6909	1,38	0,2901	0,8489	2,28	0,00770	0,0831
0,50	0,8662	0,7133	1,40	0,2782	0,8338	2,30	0,00625	0,07392
0,52	0,8559	0,7351	1,42	0,2665	0,8182	2,32	0,00527	0,06531
0,54	0,8453	0,7561	1,44	0,2550	0,8020	2,34	0,00440	0,05735
0,56	0,8344	0,7763	1,46	0,2438'	0,7854	2,36	0,00364	0,04997
0,58	0,8233	0,7958	1,48	0,2327	0,7683	2,38	0,00298	0,04320
0,60	0,8119	0,8145	1,50	0,2219	0,7510	2,40	0,00241	0,03702
0,62	0,8002	0,8322	1,52	0,2114	0,7329	2,42	0,00192	0,03139
0,64	0,7883	0,8493	1,54	0,2011	0,7146	2,44	0,00151	0,02632
0,66	0,7760	0,8653	1,56	0,1911	0,6961	2,46	0,00117	0,02183
0,68	0,7637	0,8806	1,58	0,1814	0,6772	2,48	0,00089	0,01781
0,70	0,7511	0,8950	1,60	0,1719	0,6580	2,50	0,00066	0,01434
0,72	0,7384	0,9085	1,62	0,1627	0,6387	2,52	0,00048	0,01128
0,74	0,7253	0,9211	1,64	0,1538	0,6191	2,54	0,00034	0,00875
0,76	0,7122	0,9327	1,66	0,1452	0,5994	2,56	0,00024	0,00656
0,78	0,6989	0,9435	1,68	0,1368	0,5795	2,58	0,00015	0,00481
0,80	0,6854	0,9533	1,70	0,1287	0,5596	2,60	0,00010	0,00336
0,82	0,6718	0,9622	1,72	0,1209	0,5396	2,62	0,00006	0,00225
0,84	0,6581	0,9702	1,74	0,1134	0,5196	2,64	0,00003	0,00143
0,86	0,6443	0,9771	1,76	0,1062	0,4996	2,66	0,00002	0,00084
0,88	0,6304	0,9833	1,78	0,09922	0,4796	2,68	0,00001	0,00043
0,90	0,6194	0,9884	1,80	0,09256	0,4598	2,70	0,00000	0,00022

Таблица П.2 – Газодинамические функции для насыщенного водяного пара $k=1,13$

λ	Π	q	λ	Π	q	λ	Π	q
0,10	0,9948	0,1615	1,04	0,5524	0,9983	1,98	0,0928	0,3916
0,12	0,9914	0,1937	1,06	0,5392	0,9958	2,00	0,0878	0,3768
0,14	0,9896	0,2251	1,08	0,5262	0,9928	2,02	0,0829	0,3619
0,16	0,9861	0,2565	1,10	0,5135	0,9896	2,04	0,0783	0,3472
0,18	0,9827	0,2876	1,12	0,5002	0,9845	2,06	0,0739	0,3332
0,20	0,9794	0,3186	1,14	0,4877	0,9797	2,08	0,0696	0,3190
0,22	0,9743	0,3497	1,16	0,4749	0,9740	2,10	0,0655	0,3056
0,24	0,9700	0,3791	1,18	0,4620	0,9668	2,12	0,0616	0,2920
0,26	0,9650	0,4088	1,20	0,4494	0,9594	2,14	0,0579	0,2789
0,28	0,9590	0,4378	1,22	0,4372	0,9543	2,16	0,0543	0,2660
0,30	0,9531	0,4666	1,24	0,4248	0,9431	2,18	0,0509	0,2535
0,32	0,9474	0,4951	1,26	0,4124	0,9336	2,20	0,0477	0,2415
0,34	0,9400	0,5223	1,28	0,4001	0,9235	2,22	0,0446	0,2297
0,36	0,9335	0,5505	1,30	0,3883	0,9132	2,24	0,0416	0,2183
0,38	0,9260	0,5761	1,32	0,3761	0,9016	2,26	0,0389	0,2072
0,40	0,9179	0,6017	1,34	0,3646	0,8905	2,28	0,0364	0,1963
0,42	0,9099	0,6269	1,36	0,3530	0,8781	2,30	0,0337	0,1859
0,44	0,9019	0,6680	1,38	0,3417	0,8658	2,32	0,0314	0,1769
0,46	0,8932	0,6755	1,40	0,3305	0,8529	2,34	0,0291	0,1661
0,48	0,8838	0,6983	1,42	0,3192	0,8388	2,36	0,0270	0,1568
0,50	0,8745	0,7206	1,44	0,3083	0,8249	2,38	0,0250	0,1478
0,52	0,8653	0,7424	1,46	0,2976	0,8110	2,40	0,0232	0,1392
0,54	0,8554	0,7632	1,48	0,2872	0,7962	2,42	0,0214	0,1308
0,56	0,8456	0,7834	1,50	0,2770	0,7816	2,44	0,01973	0,1188
0,58	0,8351	0,8025	1,52	0,2730	0,7661	2,46	0,01819	0,1151
0,60	0,8242	0,8204	1,54	0,2570	0,7510	2,48	0,01672	0,1077
0,62	0,8132	0,8379	1,56	0,2472	0,7350	2,50	0,01535	0,1006
0,64	0,8023	0,8547	1,58	0,2375	0,7187	2,52	0,01409	0,09406
0,66	0,7910	0,8704	1,60	0,2285	0,7031	2,54	0,01289	0,08767
0,68	0,7799	0,8855	1,62	0,2192	0,6861	2,56	0,01179	0,08163
0,70	0,7681	0,8994	1,64	0,2103	0,6698	2,58	0,01076	0,07586
0,72	0,7564	0,9126	1,66	0,2017	0,6532	2,60	0,00981	0,07042
0,74	0,7443	0,9248	1,68	0,1932	0,6366	2,62	0,00892	0,06522
0,76	0,7316	0,9355	1,70	0,1851	0,6199	2,64	0,00809	0,06052
0,78	0,7199	0,9463	1,72	0,1771	0,6032	2,66	0,00735	0,05577
0,80	0,7070	0,9568	1,74	0,1693	0,5859	2,68	0,00664	0,05140
0,82	0,6950	0,9643	1,76	0,1617	0,5695	2,70	0,00599	0,04727
0,84	0,6819	0,9714	1,78	0,1544	0,5529	2,72	0,00541	0,04350
0,86	0,6696	0,9786	1,80	0,1474	0,5366	2,74	0,00486	0,03986
0,88	0,6563	0,9838	1,82	0,1403	0,5195	2,76	0,00436	0,03649
0,90	0,6438	0,9892	1,84	0,1337	0,5162	2,78	0,00390	0,03331
0,92	0,6304	0,9925	1,86	0,1272	0,4865	2,80	0,00348	0,03199
0,94	0,6172	0,9952	1,88	0,1210	0,4707	2,82	0,00310	0,02760
0,96	0,6049	0,9984	1,90	0,1150	0,4544	2,84	0,00276	0,02506
0,98	0,5916	0,9992	1,92	0,1090	0,4387	2,86	0,00245	0,02268
1,00	0,5787	1,0000	1,94	0,1032	0,4221	2,88	0,00217	0,02052
1,02	0,5654	0,9993	1,96	0,0980	0,4071	2,90	0,00191	0,01849

Таблица П.3 – Газодинамические функции для воздуха $k=1,4$

λ	Π	q	λ	Π	q	λ	Π	q
0,02	0,9998	0,0315	0,82	0,6597	0,9610	1,62	0,1336	0,6067
0,04	0,9990	0,0631	0,84	0,6454	0,9691	1,64	0,1248	0,5850
0,06	0,9979	0,0945	0,86	0,6310	0,9764	1,66	0,1163	0,5630
0,08	0,9963	0,1259	0,88	0,6165	0,9826	1,68	0,1081	0,5409
0,10	0,9942	0,1571	0,90	0,6019	0,9879	1,70	0,1003	0,5187
0,12	0,9916	0,1832	0,92	0,5873	0,9923	1,72	0,0928	0,4965
0,14	0,9886	0,2190	0,94	0,5726	0,9957	1,74	0,0856	0,4741
0,16	0,9851	0,2497	0,96	0,5579	0,9981	1,76	0,0787	0,4520
0,18	0,9812	0,2801	0,98	0,5431	0,9995	1,78	0,0722	0,4296
0,20	0,9768	0,3102	1,00	0,5283	1,000	1,80	0,0660	0,4075
0,22	0,9720	0,3401	1,02	0,5135	0,9995	1,82	0,0602	0,3855
0,24	0,9668	0,3696	1,04	0,4987	0,9980	1,84	0,0546	0,3638
0,26	0,9611	0,3987	1,06	0,4840	0,9957	1,86	0,0494	0,3423
0,28	0,9550	0,4274	1,08	0,4693	0,9924	1,88	0,0445	0,3211
0,30	0,9485	0,4557	1,10	0,4546	0,9880	1,90	0,0399	0,3002
0,32	0,9415	0,4835	1,12	0,4400	0,9829	1,92	0,0356	0,2797
0,34	0,9342	0,5109	1,14	0,4255	0,9768	1,94	0,0316	0,2596
0,36	0,9265	0,5377	1,16	0,4111	0,9698	1,96	0,0279	0,2400
0,38	0,9183	0,5640	1,18	0,3969	0,9620	1,98	0,0245	0,2209
0,40	0,9097	0,5897	1,20	0,3827	0,9531	2,00	0,0214	0,2024
0,42	0,9008	0,6149	1,22	0,3687	0,9435	2,02	0,0185	0,1845
0,44	0,8915	0,6394	1,24	0,3548	0,9331	2,04	0,0159	0,1672
0,46	0,8819	0,6633	1,26	0,3411	0,9217	2,06	0,0136	0,1507
0,48	0,8719	0,6865	1,28	0,3276	0,9096	2,08	0,0115	0,1348
0,50	0,8616	0,7091	1,30	0,3142	0,8969	2,10	0,0095	0,1198
0,52	0,8509	0,7309	1,32	0,3010	0,8831	2,12	0,00792	0,1055
0,54	0,8400	0,7520	1,34	0,2880	0,8688	2,14	0,00646	0,0921
0,56	0,8287	0,7724	1,36	0,2753	0,8538	2,16	0,00519	0,0795
0,58	0,8172	0,7920	1,38	0,2628	0,8380	2,18	0,00410	0,0678
0,60	0,8053	0,8109	1,40	0,2505	0,8216	2,20	0,00318	0,0570
0,62	0,7932	0,8288	1,42	0,2385	0,8046	2,22	0,00241	0,0472
0,64	0,7808	0,8459	1,44	0,2267	0,7869	2,24	0,00178	0,0408
0,66	0,7681	0,8623	1,46	0,2152	0,7687	2,26	0,00127	0,0290
0,68	0,7553	0,8778	1,48	0,2040	0,7499	2,28	0,00087	0,0234
0,70	0,7422	0,8924	1,50	0,1930	0,7301	2,30	0,00057	0,0175
0,72	0,7289	0,9061	1,52	0,1824	0,7110	2,32	0,00035	0,0124
0,74	0,7154	0,9189	1,54	0,1720	0,6909	2,34	0,00020	0,00834
0,76	0,7017	0,9308	1,56	0,1619	0,6703	2,36	$0,988 \cdot 10^{-4}$	0,00513
0,78	0,6878	0,9418	1,58	0,1522	0,6494	2,38	$0,413 \cdot 10^{-4}$	0,00277
0,80	0,6738	0,9518	1,60	0,1427	0,6282	2,40	$0,128 \cdot 10^{-4}$	0,00121

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО КУРСОВОГО ТА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
“ РОЗРАХУНОК ЕЖЕКТОРУ”

для студентів фахів 7.095010 “Теплоенергетика”,
7.000008 “ Енергетичний менеджмент”

Російською мовою

Укладачі: АКМЕН Роберт Генріхович
ЖЕЛТОНОЖЕНКО Андрій Петрович

Відповідальний за випуск В.М. Кошельник

Роботу до видання рекомендував Ю. В. Шульгін

В авторській редакції.

План 2007р., поз. 64

Підп. до друку_____ Формат 60x84 1/16. Папір офсетн. Друк – ризографія.
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 2,3 Обл.-вид.арк _____ Тираж 50 прим.
Зам._____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ „ХПІ” 61002, Харків 2, вул. Фрунзе, 21
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №116 від 10.07.2000р.

Друкарня НТУ „ХПІ”, 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21